

White-Etching-Cracks-Detektion an Wälzlagern mit Laser-Doppler-Vibrometer

X. Cao, C. Rembe

TU Clausthal – Institut für Elektrische Informationstechnik (IEI)

cao@iei.tu-clausthal.de, rembe@iei.tu-clausthal.de

B. Tarigan, H. Schwarze

TU Clausthal – Institut für Tribologie und Energiewandlungsmaschinen (ITR)

mbra@itr.tu-clausthal.de, schwarze@itr.tu-clausthal.de

Abstract

Failure modes, White Etching Cracks (WECs) and White Etching Areas (WEAs), appear prevalently in rolling contact bearings. There is still a lack of efficient methods to identify such failure modes as early as possible before the visible crack appears on the bearing surface. In this article, a comparison was done between the measured operational deflection shapes (ODS) from a rolling contact bearing with and without WECs and WEAs. The measurement was obtained by using a self-designed vibrometer robot system. A modal shaker was used to excite the bearing. The comparison was done by using the Cross Signature Assurance Criterion (CSAC), which checks the correlation between two ODS's. The results show that the ODS's from the bearing with and without WECs and WEAs are not correlated in the frequency spectrum. Therefore monitoring the ODS's of the bearing by using the CSAC criterion seems to be feasible to detect the existence of WECs and WEAs in bearings. In order to check the applicability of the CSAC method, a further test was performed on a small-scaled bearing test bench by using a multipoint vibrometer. The results show that the CSAC method is applicable to detect changing of vibration behavior of the system even with influence from the drive unit of the test bench.

1 Einleitung

Durch die Entstehung von den sogenannten White Etching Cracks (WECs) und White Etching Areas (WEAs) in Wälzlagern (Abb. 1a) [1–2] treten häufig frühzeitige Betriebsschäden in Windkraftanlagen auf. WECs sind spezielle Rissnetzwerke, die sich zunächst unterhalb der Lageroberfläche ausbilden und dann bis an die Oberfläche fortschreiten. Die um WEC liegenden weißen Flächen in Gefügebildern werden WEAs genannt. Sie bestehen aus feinkörnigem, kohlenstoffübersättigtem Ferrit oder kubischem Martensit [3–4]. Die Entstehungsmechanismen zur Ausbildung von WECs und WEAs sind bisher noch nicht vollständig geklärt. Nach heutigem Wissenszustand sind Material des Lagers, Zusatzbeanspruchungen (Reibung, Stromdurchgang), Wälzbeanspruchungen und Schmierstoffe die wesentlichen Einflussfaktoren [5–6]. Mit Hilfe des Zylinderrollenlager-Prüfstands [7] am Institut für Tribologie und Energiewandlungsmaschinen können WECs und WEAs reproduzierbar in Wälzlagern erzeugt werden, wobei aber auch immer zusätzlich Oberflächenschäden auftreten.

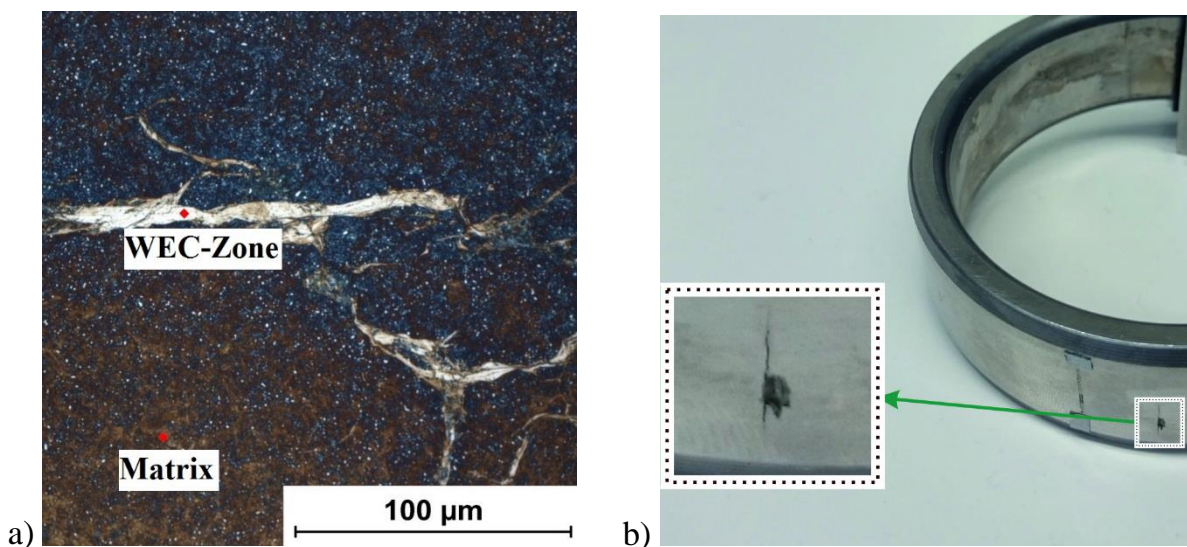


Abb. 1: a) Gefügebild mit WECs, b) beschädigter Innenring eines Wälzlagers

Bisher fehlt noch eine Möglichkeit, WECs und WEAs so frühzeitig zu detektieren, dass noch keine Oberflächenschäden aufgetreten sind. Dies liegt daran, dass eine Erkennung von WECs und WEAs kurz nach dem Entstehen, mit den üblichen Beschleunigungszeitsignalen nicht aufgelöst werden kann. Für die Ursachenforschung der Ausbildung von WECs und WEAs ist es aber notwendig, die Rissbildung bereits in einem sehr frühen Stadium zu detektieren. Das Verständnis der Entstehung von WECs und

WEAs ist notwendig, um ein Prüfverfahren zu erarbeiten, mit dem Risse frühzeitig (vor Oberflächenschädigungen) erkannt werden können. Risse auf der Lageroberfläche führen schnell zu einer Zerstörung des Lagers. Im WEA-Gebiet ist das Material 30 % bis 50 % härter als das umgebende intakte Material [3], so dass das Schwingungsverhalten des Systems beeinflusst wird. Daraus ergibt sich somit ein messtechnischer Zugang zur zerstörungsfreien Detektion von Rissen [8]. In diesem Beitrag werden zunächst Schwingungsmessungen an dem Innenring eines Wälzlagers (Abb. 1b) im beschädigten und unbeschädigten Zustand unter idealen Testbedingungen durchgeführt.

Um eine erste Aussage über das Potenzial der vibrationsbasierenden Messmethode zur Detektion der Entstehung von WECs und WEAs zu treffen, werden die gemessenen ODS's mit Hilfe vom Cross-Signature-Assurance-Criterion (CSAC) miteinander quantitativ verglichen. Anschließend werden Schwingungsmessungen an einem Prüfstand durchgeführt, um die Einsatzbarkeit der CSAC-Methode für den Prüfstandbetrieb zu evaluieren. Aufgrund der Geräteverfügbarkeit können zunächst keine Messungen am Zylinderrollenlager-Prüfstand durchgeführt werden. Stattdessen wird diese Untersuchung an einem transportablen Prüfstand durchgeführt, der zum Multipoint-Vibrometer gebracht werden kann. Im Gegensatz zum Zylinderrollenlager-Prüfstand wird der Prüflager im transportablen Prüfstand unbelastet betrieben. Es befindet sich kein Zusatzmechanismus, der die Ausbildung von WECs und WEAs erzeugt. Ein direkter Vergleich zwischen Lager im Neuzustand und im Zustand mit WEC-Schaden im Material ist mit diesem Prüfstand daher nicht realisierbar. Um dennoch eine Aussage über die Einsatzbarkeit der CSAC-Methode zur Erkennung der Systemschwingverhaltensänderung unter Einflüsse aus Umgebung zu erlangen, wird die Betriebstemperatur des Lagers lokal künstlich variiert. Die lokale Änderung der Betriebstemperatur führt ebenso zur Schwingverhaltensänderung des gesamten Systems.

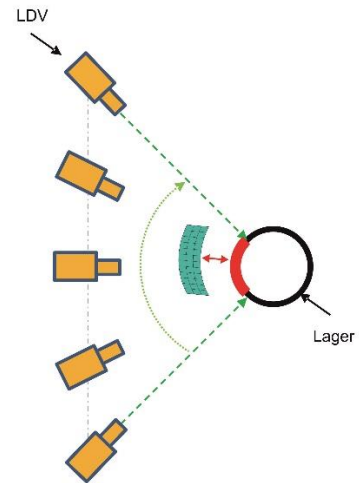
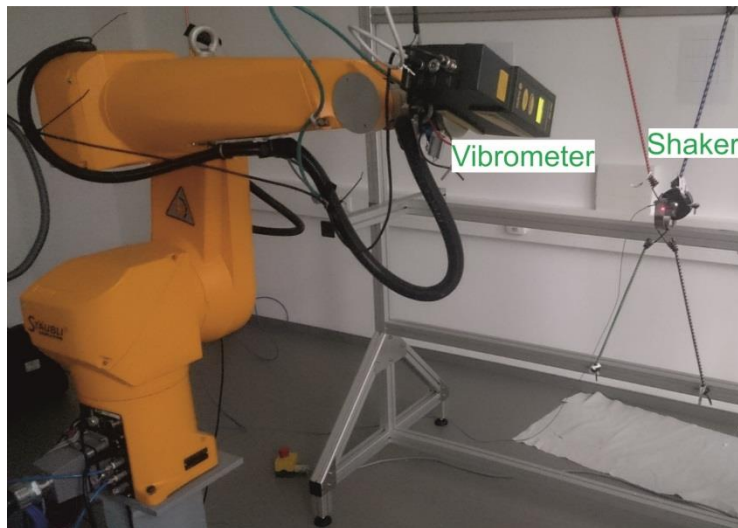


Abb. 2: links: Messaufbau, rechts: Messablauf

2 Messungen an Lagerinnenringen

2.1 Methoden

Die Lagerringe werden durch weiche Aufhängungen möglichst gut von ihrer Umgebung entkoppelt, damit ein Erreger die Resonanzen des Lagers ungestört anregen kann. Für die Schwingungsmessungen kommt ein eigenentwickeltes robotergesteuertes Vibrometer-Messsystem zum Einsatz [9]. Das Messsystem besteht wesentlich aus einem 6-Achs-Industrieroboter RX90L der Firma STÄUBLI und einem 1D-Laser-Doppler-Vibrometer (1D-LDV) PDV 100 der Firma Polytec (Abb. 2 links). Diese Kombination ermöglicht eine Oberflächenschwingungsmessung bei reproduzierbaren Schwingungen durch das Abrastern mehrerer Messpunkte nacheinander und kann für Strukturen mit gekrümmten Oberflächen besonders von Vorteil sein, weil das LDV mit Hilfe des Roboterarms für jeden Messpunkt aus der optimalen Messposition messen kann. Für die hier durchgeführten Messungen befinden sich die Messpositionen immer radial zur Rotationsachse (Abb. 2 rechts). Insgesamt werden 52 Messpunkte dabei erfasst, um die Schwingformen mit zu ermitteln. Als Anregungsquelle wird ein Mini-Shaker (Brüel&Kjær Type 4810) verwendet (vgl. Abb. 2 links). Damit die Lauffläche des Lagerringes von der Shaker-Anregung verschont bleibt, wird ein Adapter auf die Lauffläche angebracht. Der Adapter besteht aus zwei Blechen mit harten Gummis auf der Innenseite. Die ebene Außenfläche des Adapters erleichtert die Anbindung zum Shaker. Zur Aufbringung der Anregung befindet sich ein Magnet zwischen dem Shaker-Kopf und der Außenseite des Adapters. Der Lagerring wird so positioniert, dass der Schadensbereich sich ungefähr in der Mitte des Messgitters befindet,

wobei an der Rückseite mit einem Chirp-Signal periodisch angeregt wird. Die Anregungssignale werden während der Messungen mitgemessen. Da die Schwingungen reproduzierbar sind, können die Messdaten durch das Abrastern erfasst werden. Um die Spektren der Messdaten zu ermitteln, werden die gemessenen Zeitsignale zunächst im Zeitbereich mit einer Rechteckfensterfunktion bearbeitet, um die Einflüsse durch Einschwingvorgang durch Roboterbewegung und Leck-Effekt (Leakage) [10] zu vermeiden. Die Periodendauer des Geschwindigkeitssignals und des Anregungssignals sind gleich. Letztere lässt sich bei der Definition des Chirp-Signals genau bestimmen. Somit sind die für Auswertung verwendeten Messsignale immer n-fache Perioden lang und frei von Leck-Effekten.

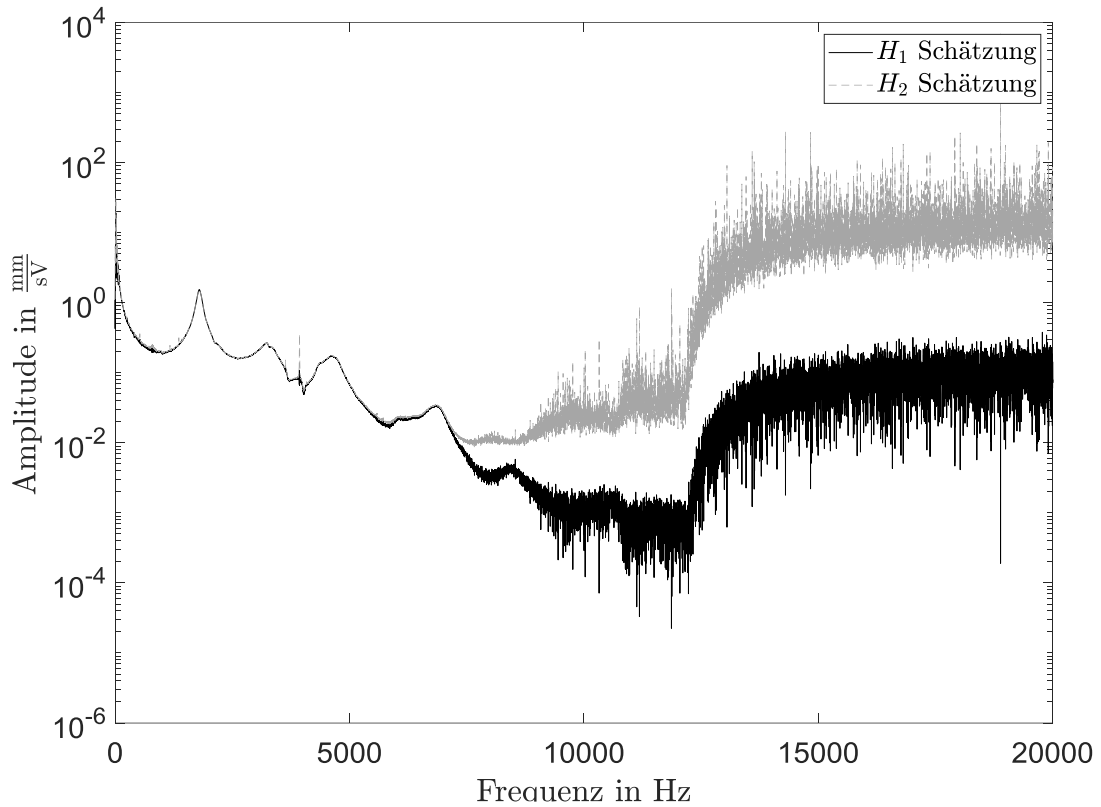


Abb. 3: H_1 vs H_2 -Schätzung am Messpunkt 1

Für die Darstellung bzw. den Vergleich einzelner Messpunkte müssen noch die Übertragungsfunktionen zwischen Geschwindigkeitsspektren und Anregungssignal ermittelt werden. Diese werden mit der $H_{1,2}$ -Schätzmethode nach

$$\underline{H_1}(f) = \frac{\sum_{i=1}^N \underline{F_i^*}(f) \underline{X_i}(f)}{\sum_{i=1}^N \underline{F_i^*}(f) \underline{F_i}(f)} \quad (1)$$

$$\underline{H_2}(f) = \frac{\sum_{i=1}^N \underline{X_i^*}(f) \underline{X_i}(f)}{\sum_{i=1}^N \underline{X_i^*}(f) \underline{F_i}(f)} \quad (2)$$

berechnet [11]. Dabei sind F das Eingangssignal (Anregungssignal) und X das Ausgangssignal (Geschwindigkeitssignal). Komplexe Größen werden durch den Unterstrich gekennzeichnet. Das hochgestellte Sternchen steht für komplexe Konjugation. Der laufende Index i beschreibt die Periodennummer und N ist die Anzahl der Perioden. Alle Größen H_1 , H_2 , F und X sind von der Frequenz f abhängig. Im Gegensatz zu weiteren Schätzungsmethoden wird die H_1 -Schätzung nur durch den Fehler des Anregungssignals beeinflusst, weil die Kreuzleistungsspektren unkorrelierter Größen durch hinreichend große Mittelungszahlen (in diesem Fall Periodenanzahl der Messungen n) gegen Null streben. n liegt zwischen 30 und 80. Das Anregungssignal wird direkt aus dem Signalgenerator aufgenommen und wird daher als fehlerfrei angenommen. Die H_1 -Schätzung kann daher in diesem Fall besseres Ergebnis liefern. In Abb. 3 sind die nach H_1 - und H_2 -Schätzung ermittelten Übertragungsfunktionen am Messpunkt 1 des beschädigten Lagers aufeinander dargestellt. Man sieht, dass die H_1 -Schätzung insbesondere im oberen Frequenzbereich (ab 6000 Hz) weniger mit Rauschen behaftet ist als die H_2 -Schätzung. Um die Eigenfrequenzen und die zugehörigen Schwingformen zu ermitteln und miteinander zu vergleichen, soll zunächst die Qualität aller Übertragungsfunktionen überprüft werden. Messpunkte mit schlechter Signalqualität können Schwingformen verfälschen und sollen vor der Darstellung berücksichtigt werden. Zur Beurteilung der Qualität der gemessenen Übertragungsfunktion wird die Kohärenzfunktion γ^2 herangezogen [11]. Sie wird definiert durch

$$\underline{\gamma^2}(f) = \frac{\underline{H_1}(f)}{\underline{H_2}(f)} = \frac{\underline{G_{FX}}(f) \underline{G_{XF}}(f)}{\underline{G_{FF}}(f) \underline{G_{XX}}(f)}. \quad (3)$$

G steht hier für das gemittelte einseitige Leistungsspektrum aus zwei Signalen, welche durch die beiden Indizes beschrieben werden. Sind die Indizes gleich ($G_{FF}(f)$ und $G_{XX}(f)$), dann ist G das Autoleistungsspektrum, ansonsten ($G_{FX}(f)$ und $G_{XF}(f)$) das Kreuzleistungsspektrum. Die Kohärenzfunktion beschreibt die lineare Abhängigkeit zwischen zwei Signalen. Da bei idealen Signalen die H_1 - und H_2 -Schätzung das gleiche Ergebnis erzielen, beträgt der maximale (beste) Wert der Kohärenzfunktion 1. Der Wert Null wird erreicht, wenn die beiden Signale voneinander unkorreliert sind.

Zum Vergleich der Schwingformen werden mehrere Kriterien im Bereich Modal-Testing entwickelt [12]. Diese Kriterien werden oft verwendet, um die Übereinstim-

mung zwischen analytischem Modell und Experiment zu überprüfen. Alle Kriterien haben die Werte zwischen Null und 1 und sind vom Prinzip her ähnlich wie die Kohärenzfunktion (Gleichung 3). Das bekannteste Kriterium ist das Modal-Assurance-Criterion (MAC) [13]. Dabei werden die modalen Schwingformen aus zwei Messungen oder Berechnungen verglichen. Da es hier um Messungen geht, sind die Kriterien in Frequenzspektrum wie z. B. Cross-Signature-Assurance-Criterion (CSAC) besser geeignet als MAC [14]. Das CSAC vergleicht Schwingformen beider Lagerzustände bei jeder Frequenz und wird durch

$$\text{CSAC}(f) = \frac{\left| (\tilde{H}^A(f))^H \tilde{H}^B(f) \right|^2}{\left((\tilde{H}^A(f))^H \tilde{H}^A(f) \right) \left((\tilde{H}^B(f))^H \tilde{H}^B(f) \right)} \quad (4)$$

definiert. Das CSAC gibt den Grad der linearen Abhängigkeit von zwei Schwingformen an und ist daher vom Prinzip her gleich wie der MAC-Wert. Der Vektor \tilde{H}_j beschreibt die Schwingform des Lagers bei Frequenz f . Die Elemente des Vektors \tilde{H}_j sind die Werte aller Übertragungsfunktionen bei der Frequenz f . Der CSAC-Wert lässt sich wie die Kohärenzfunktion zwischen dem Wert 0 (unkorreliert) und dem Wert 1 (vollständig korreliert) über die Frequenz f darstellen.

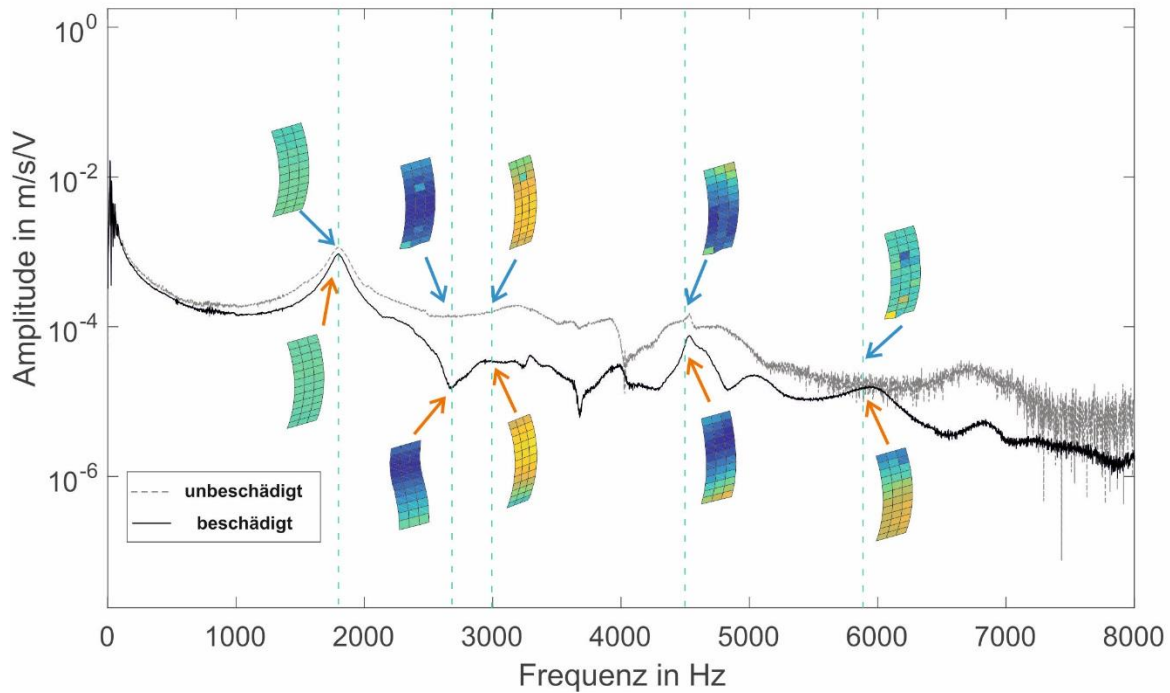


Abb. 4: Übertragungsfunktionen H_1 am Messpunkt 1 und einige ausgewählte Schwingformen

Als Faustregel gilt: Ein Wert größer als 0,9 steht für gleiche bzw. sehr gut korrelierte Messungen und Werte kleiner als 0,9 für unterschiedliche bzw. schwach korrelierte Messungen [15].

2.2 Ergebnisse

In Abb. 4 werden einige gemessene Schwingformen entlang der Frequenzachse grafisch dargestellt. Die Übertragungsfunktion an einem ausgewählten Messpunkt (Messpunkt 1) wird beispielhaft als Referenz mit eingetragen. Der Unterschied zwischen den beiden Lagerzuständen im Frequenzbereich lässt sich sowohl an Übertragungsfunktionen als auch an Schwingformen eindeutig erkennen. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Detektion der Entstehung von WECs und WEAs in Wälzlagern mit Hilfe einer Spektralanalyse des Geschwindigkeitssignals möglich ist. Außerdem ist zu erkennen, dass sich die Grundswingformen der beiden Lagerzustände (radial-symmetrische Ausdehnung) bei ungefähr 1800 Hz kaum voneinander unterscheiden. Erst ab 2000 Hz sind Unterschiede zwischen beiden Lagerzuständen zu erkennen.

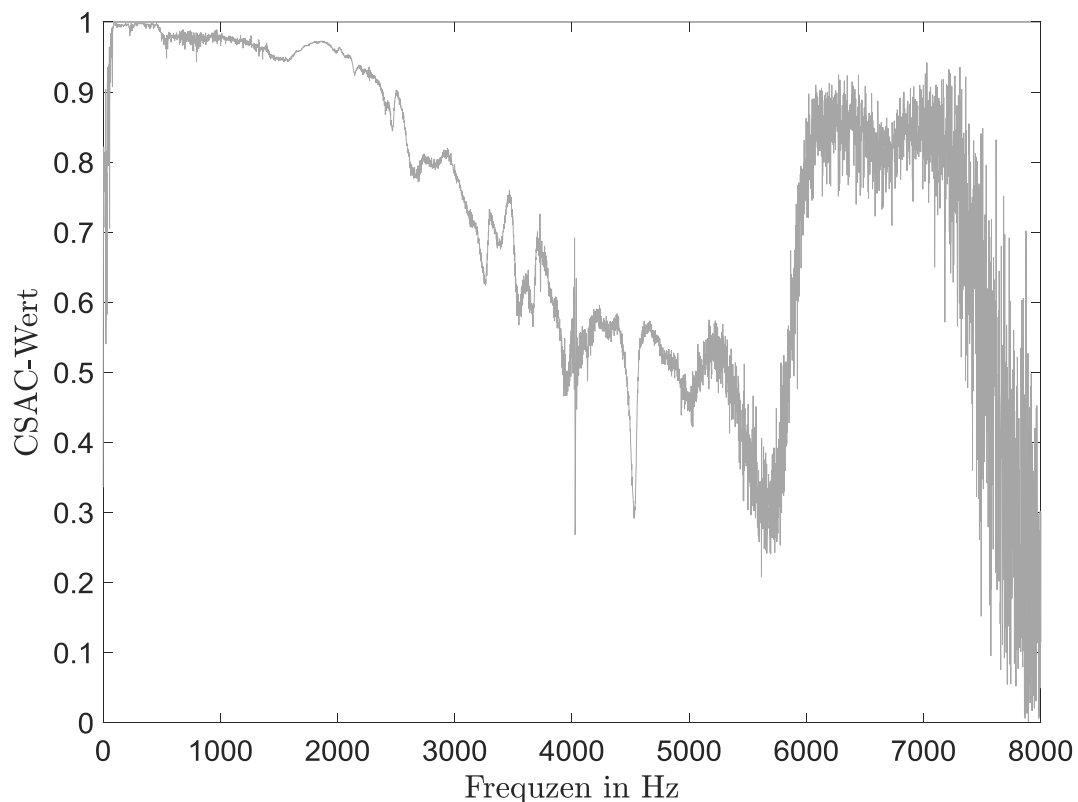


Abb. 5: CSAC-Vergleich aus Übertragungsfunktionen mit guten Kohärenzwerten

Da auch eine schlechte Signalqualität die CSAC-Werte verschlechtern kann, wird zunächst mit Hilfe der Kohärenzfunktionen nur ein Teil der gesamten gemessenen Übertragungsfunktionen ausgewählt, bei dem die Frequenzkomponenten sehr gute Kohärenzwerte und somit gute Signalqualität besitzen. Lediglich aus diesen selektierten Übertragungsfunktionen werden die CSAC-Werte berechnet und in Abb. 5 dargestellt. Ähnliche Ergebnisse werden auch bei einem FRAC-Vergleich angezeigt [16]. Dies deutet darauf hin, dass die durch WEC und WEA hervorgerufenen lokalen Schädigungen die Grundswingformen des Lagers kaum beeinflussen. Die Einflüsse durch solche lokalen Materialeigenschaftsänderungen lassen sich im oberen Frequenzbereich mit Hilfe von CSAC besser identifizieren. Die CSAC-Werte sinken hier ab 2000 Hz drastisch ab, was einen großen Unterschied zwischen Schwingformen beider Lager bedeutet. Im Bereich ab 6000 Hz steigen die CSAC-Werte wieder an. Das kann daran liegen, dass es bei hohen Frequenzen nicht mehr genügend Messpunkte für die Auswertung gibt, um die Schwingformen eindeutig darstellen zu können. Dies führt vermutlich zu einem falschen Ansteigen der CSAC-Werte ab etwa 6000 Hz. Daher wird hier die CSAC-Kurve nur bis 6000 Hz betrachtet. Somit kann man feststellen, dass das Schwingverhalten beider Lager zwischen 2000 Hz und 6000 Hz deutliche Unterschiede aufweist.

3 Messungen im Betrieb

3.1 Methoden

Die Messungen an Lagerinnenringen zeigen, dass die Schwingverhaltensänderungen unter idealen Testbedingungen mit Hilfe des CSAC-Wertes sehr gut zu erkennen sind. Am Wälzlagerprüfstand können jedoch zusätzlich Störgrößen auftreten, die den Detektionsvorgang beeinflussen. Um die Einsatzbarkeit der CSAC-Methode unter Zusatzeinflüsse aus der Umgebung zu überprüfen, werden weitere Messungen an einem mobilen Prüfstand (vgl. Abb. 6 links) durchgeführt, der zum Mehrkanalvibrometer gebracht werden kann. Ein Komplettwälzlager wird dabei in einem modifizierten Lagerblock eingebaut. Der Innenring des Lagers wird von einer Bohrmaschine angetrieben. Um die Betriebsschwingform des Lagers zu erfassen, befinden sich drei Langlöcher am Lagerbock. Da die Schwingungen am Prüfstand generell nicht reproduzierbar sind, müssen Schwingungen an allen Punkten gleichzeitig erfasst werden. Dafür wird die Mehrkanallaservivibrometrie eingesetzt [17]. Hier wird das Multipoint Vibrometer MPV-800 der Firma Polytec verwendet. In Abb. 6 links ist der Messaufbau dargestellt. Insgesamt verteilen sich 18 Messpunkte auf der Oberfläche des Lageraußenringes. In-

nerhalb jedes Langlochs befinden sich jeweils sechs Messpunkte. Die Messköpfe des Multipoint Vibrometers werden so angeordnet, dass die Vibrationsgeschwindigkeiten in radialer Richtung zur Rotationsachse der Welle erfasst werden. In Abb. 6 rechts ist das Messgitter grafisch dargestellt. Die Messpunkte sind in rot markiert. Um unterschiedliche Betriebstemperaturen zu simulieren, wird die innere Seite des Lagerblocks mit Hilfe von einem Heißluftgebläse bis auf 80 °C beheizt. Auf der äußeren Seite des Lagerblocks wird ein Temperaturfühler angebracht, um die Betriebstemperatur zu überwachen. Nachdem die gewünschte Betriebstemperatur erreicht wird, wird der Lager bis auf die Nenndrehzahl (2600 Umdrehung/min) angefahren. Jeweils bei einer Betriebstemperatur von ca. 20 °C und ca. 80 °C wurden einige Messungen durchgeführt. Da eine Messung nur etwa 2 s dauert, kann die Betriebstemperatur während der Messung als konstant angenommen werden.

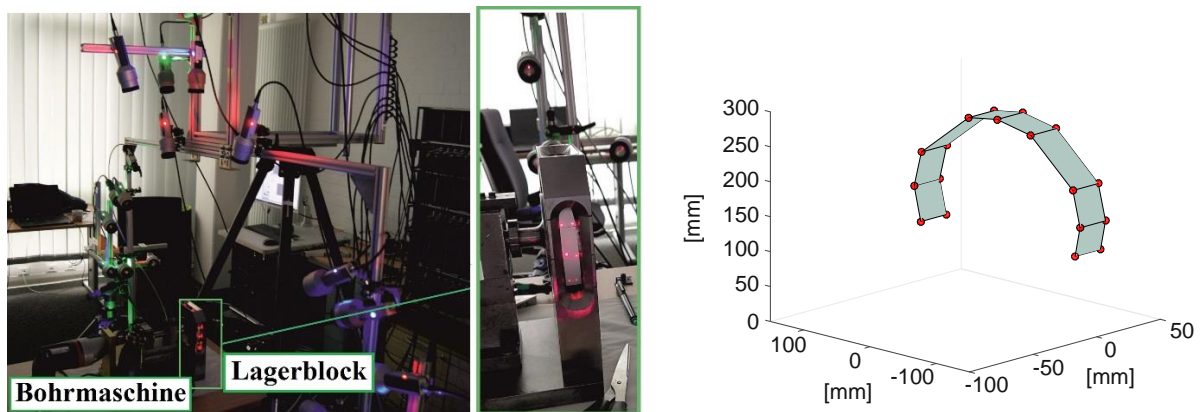


Abb. 6: links: Messaufbau, rechts: Messgitter

3.2 Ergebnisse

Zunächst wird jeweils eine Messung bei 20 °C und 80 °C durchgeführt. Die Ergebnisse werden miteinander verglichen. Die Abb. 7 links zeigt die Schwingform der Messung bei 20 °C bei einer Eigenfrequenz von 3000 Hz an. Vergleicht man diese Messung mit der Schwingform aus der Messung bei 80 °C bei der gleichen Frequenz (Abb. 7 rechts), erkennt man, dass diese beiden Schwingformen sich deutlich voneinander unterscheiden. In Abb. 8 a) ist der Vergleich fürs gesamte Spektrum als CSAC-Werte dargestellt. Im Bereich zwischen 2500 Hz und 3500 Hz befindet sich ein Maximum ungefähr bei 2602 Hz etwas nach links verschoben von der Eigenfrequenz 3000 Hz bei 20 °C. Dies ist ein Hinweis darauf, dass sich die Eigenfrequenz um 3000 Hz durch die Betriebstemperaturerhöhung verschoben hat. Dieser Zusammen-

hang wird deutlich, wenn man die Schwingform bei der Eigenfrequenz 2602 Hz aus der Messung bei 80 °C mit Schwingformen bei allen Frequenzen aus der Messung bei 20 °C vergleicht. Ein Vergleich als CSAC-Werte ist in Abb. 8 b) dargestellt. Das Maximum liegt hier genau bei 3000 Hz mit dem Wert nahezu eins. Das bedeutet, dass die Temperaturerhöhung von 20 °C auf 80 °C zu einer Verschiebung der Systemeigenfrequenz von 3000 Hz auf 2602 Hz geführt hat.

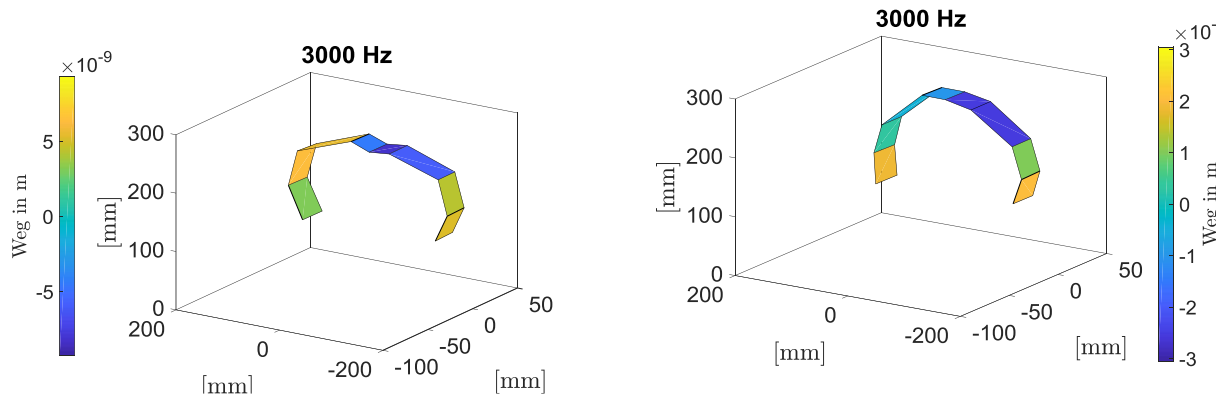


Abb. 7: links: Schwingform der Messung bei 20 °C bei 3000 Hz, rechts: Schwingform der Messung bei 80 °C bei 3000 Hz

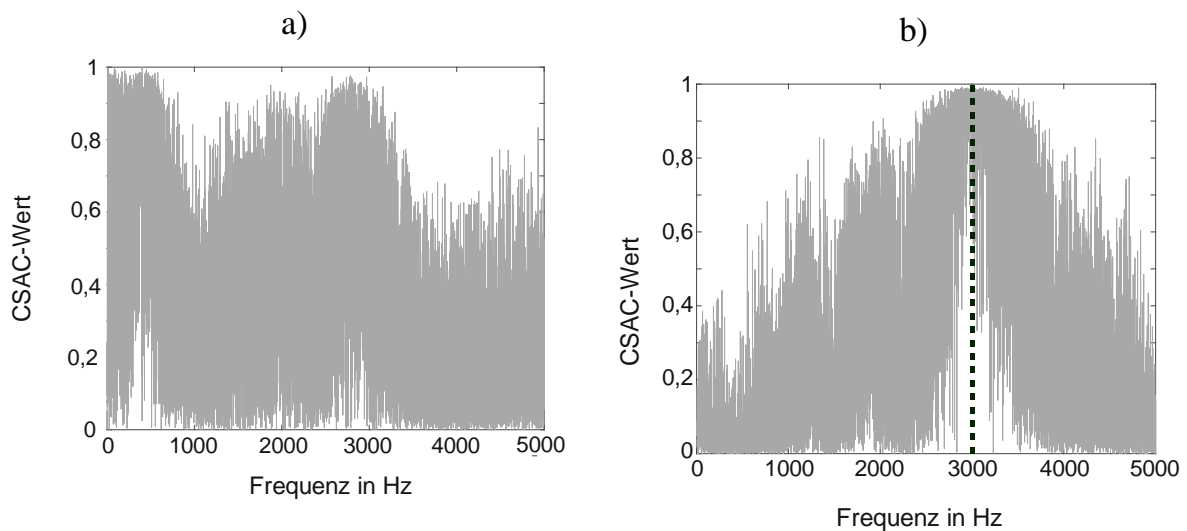


Abb. 8: CSAC-Werte: a) Vergleich Messungen bei 20 °C und 80 °C, b) Vergleich der Messung bei 80 °C bei 2602 Hz mit der Messung 20 °C bei allen Frequenzen

Diese Untersuchung zeigt, dass die vorgestellte CSAC-Methode auch für die Erkennung von Schwingungseigenschaftsänderungen unter Umgebungseinflüssen einsetzbar

ist. Für die Erkennung von Schwingungseigenschaftsänderungen durch Betriebstemperaturänderung sollen die CSAC-Werte in einem Frequenzbereich mit geringer Modendichte bestimmt werden. Für das untersuchte Prüfstandsystem liegt so ein Bereich geringer Modendichte bei den Frequenzen von 0 Hz bis 5000 Hz.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die mit Hilfe eines robotergesteuerten Vibrometer-Messsystem durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Ausbildung von WECs und WEAs in Lagerringen Schwingverhaltensänderungen verursachen. Diese Veränderungen lassen sich mit geeignetem Messsystem auch vibrationsbasierend zerstörungsfrei detektieren. Die Untersuchungen zeigen auch, dass WECs und WEAs das Spektrum vor allem im Frequenzbereich oberhalb der Grundschwingungsfrequenzen verändern. Im Bereich, wo Grundschwingformen dominierend sind, sind kaum Veränderungen zu erkennen. Mit Hilfe der vorgestellten CSAC-Methode können Schwingungseigenschaftsänderungen quantitativ identifiziert werden. Dadurch ist ein Online-Monitoring des Lagerzustands z. B. am realen Prüfstand denkbar.

Die Untersuchungen an einem transportablen Prüfstand zeigen, dass die Schwingungseigenschaftsänderungen durch Änderungen von Systemeigenschaften, in diesem Fall durch die Erhöhung der Betriebstemperatur, mit der CSAC-Methode auch unter realitätsnäheren Umgebungsbedingungen detektierbar sind. Die Betriebstemperaturerhöhung führt in diesem Fall zu einer Eigenfrequenzverschiebung des Systems.

Im nächsten Schritt soll die hier vorgestellte Methode am Zylinderrollenlager-Prüfstand durchgeführt werden. Dabei sollen auch möglichst viele Messpunkte mit dem Multipoint-Vibrometer gleichzeitig erfasst werden. Da der Prüfstand wesentlich komplexer als die bisher betrachteten Systeme ist, dürfte die Auswahl von günstigen Übertragungsfunktionen (Messpositionen), welche besser zur Entstehung von WECs und WEAs korreliert sind, deutlich anspruchsvoller sein.

Die mehrkanalige Messtechnik ist insbesondere für die Verwendung der CSAC-Methode an einem realen Prüfstand notwendig (mindestens zwei Messpunkte werden benötigt für einen CSAC-Vergleich). Die Zugänglichkeit von Messpositionen am Zylinderrollenlager-Prüfstand wird durch die Komplexität des Aufbaus nochmal stärker begrenzt. Die LDV-Technik ist gerade für diesen Fall durch ihre große Messbandbreite, hohe Empfindlichkeit und flexible bzw. exakte Positionierbarkeit [17] im Vergleich zu konventionellen Verfahren mit Beschleunigungssensoren sehr vorteilhaft.

Literatur

- [1] Evans, M.-H.; Richardson, A. D.; Wang, L.; Wood, R. J. K.: Effect of Hydrogen on Butterfly and White Etching Crack (WEC) Formation under Rolling Contact Fatigue (RCF). *Wear*. 306 (2013) 1-2, S. 226 – 241.
- [2] Loos, J.; Bergmann, I.; Goss, M.: Influence of Currents from Electrostatic Charges on WEC Formation in Rolling Bearings. *Tribology Transactions*. 59 (2016) 5, S. 865 – 875.
- [3] Evans, M.-H.: White structure flaking (WSF) in wind turbine gearbox bearings: effects of ‘butterflies’ and white etching cracks (WECs). *Materials Science and Technology*. 28 (2012) 1, S. 3 – 22.
- [4] Holweger, W.; Loos, J.: Beeinflussung der Wälzlagerlebensdauer durch neue Werkstoffphänomene in speziellen Anwendungen. *Antriebstechnisches Kolloquium ATK*. März, 2011.
- [5] Stadler, K.; Stubenrauch A.: Premature Bearing Failures in Wind Gearboxes and White Etching Cracks. *Power Transmission Engineering*. (2014) 10, S. 34 – 40.
- [6] Loos, J.; Blass, T.; Franke, J.; Kruhoeffter, W.; Bergmann, I.: Influences on Generation of White Etching Crack Networks in Rolling Bearings. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*. 6 (2016), S. 85 – 94.
- [7] Tarigan, B.; Schwarze, H.; Loos, J.; Blass, T.; Kruhöffter, W.: Prüfstand zur Erprobung der WEC-Bildung an Wälzlagern unter Drehdynamik. *GfT-Tagung*. September, 2017.
- [8] Doebling, S. W.; Farrar, C. R.; Prime, M. B.: A summary review of vibration based damage identification methods. *Shock and Vibration digest*. 30 (1998) 2, S. 91–105.
- [9] Ziemer, T.: Demonstration einer 3D-Schwingungsmessung mit einem Einpunkt-Laser-Doppler-Vibrometer und einem 6-Achs-Industrieroboter. Masterarbeit, TU Clausthal, 2016.
- [10] Puente León, F.; Kiencke, U.; Jäkel, H.: *Signale und Systeme*. Ausg. 5. 2011. München: Oldenbourg Verlag.
- [11] Kollmann, F. G.; Angert, R.; Schösser, T. F.: *Praktische Maschinenakustik*. Ausg. 1. 2006. Berlin: Springer Verlag.

- [12] Allemang, R. J.: The Modal Assurance Criterion – Twenty Years of Use and Abuse. Sound and Vibration. 37 (2003) 8, S. 14–23.
- [13] Allemang, R. J.: Investigation of Some Multiple Input/output Frequency Response Function Experimental Modal Analysis Techniques. PhD thesis, University of Cincinnati, 1980.
- [14] Silva, T. A. N.; Maia, N. M. M.; Barbosa, J. I.: A model updating technique based on FRFs for damped structures. Proceedings of International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2012)/ International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics (USD2012). (2012), S. 2213–2226.
- [15] Richardson, S.; Tyler, J.; McHargue, P.; Richardson M.: A New Measure of Shape Difference. Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. March (2014), S. 71–80.
- [16] Cao, X.; Tarigan, B.; Schwarze H.; Rembe, C.: Schadenserkennung an Wälzlageren. tm – Technisches Messen. 84 (2017) s1, S. 34–41.
- [17] Haist T.; Lingel C.; Osten W.; Winter M.; Giesen M.; Ritter, F.; Sandfort, K.; Rembe, C.; Bendel, K.: Multipoint vibrometry with dynamic and static holograms. Review of Scientific Instruments. 84 (2013) 121701.
- [17] Bendel, K.: Application of a multi-beam vibrometer on industrial components. AIP Conference Proceedings. Juni (2014).

Autorenanschriften

Xiaodong Cao

Technische Universität Clausthal

Institut für Elektrische Informationstechnik

Gebäude C14

Leibnizstraße 2838678 Clausthal-Zellerfeld

Telefon: 05323-724965

Telefax: 05323-723197

E-Mail: cao@iei.tu-clausthal.de